

Д-р техн. наук, проф. В.Д. Петренко,  
канд. техн. наук, доц. А.Л. Тютюкин,  
инж. Т.А. Селихова (ДИИТ)

## РЕАЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ УПРУГО-ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОГО МАССИВА С ПОМОЩЬЮ «ГРУНТОВЫХ» КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

У статті наведені теоретичні та практичні положення імітації властивостей пружно-в'язко-пластичного масиву за допомогою спеціальних „грунтових” скінченних елементів.

## REALIZATION OF ELASTIC-VISCOUS-PLASTIC MASSIF PROPERTIES BY THE «GROUND» FINITE ELEMENTS

In the article theoretical and practical positions of imitation of properties of elastic-viscous-plastic massif by the special «ground» finite elements are resulted.

Для практической реализации упруго-вязко-пластических свойств массива требуется введение в численный анализ МКЭ с помощью имитационных моделей специального конечного элемента. В дальнейшем будем называть такой элемент «грунтовым», так как он является попыткой учета трех кардинальных свойств породного массива. Суть вопроса заключается в том, что теоретически конечный элемент не имеет никаких физических свойств, если он рассматривается отвлеченно – в процессе дискретизации или проверки сходимости аппроксимирующих функций. Конечный элемент является основой для отражения в нем реальных свойств объекта, в результате чего его поведение в процессе расчетов изменяется сообразно этим свойствам.

Как известно [1], физическое поведение среды характеризуется уравнением состояния:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, t), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon$  – деформация;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;  $T$  – температура;  $t$  – время.

Уравнением (1) устанавливается зависимость между напряжениями и набором факторов, которые прямо связаны с основными свойствами сплошной среды – упругостью, пластичностью, вязкостью [2, 3]. Поэтому мы примем в построениях подход, связанный с моделированием, а точнее имитацией основных свойств среды. Этот подход является классическим, и им пользуются в традиционных разделах механики сплошной среды – теории упругости, пластичности, ползучести [4]. Важно то, что в основу этого подхода положено соответствие моделей действительным объектам, графическая визуализация кардинальных свойств среды и прозрачный физический смысл. Такой подход отличает также отсутствие произвольности и спекулятивных математических построений с неоднозначным физическим смыслом, которое является недостатком других подходов.

Свойства, которыми должен обладать «грунтовый» элемент, можно выяс-

нить из анализа поведения грунта в ходе формирования НДС. После проведенного анализа физической нелинейности поведения грунта под нагрузкой и изменения его параметров в ходе реологических явлений резюмируем его основные положения.

1. При небольшом уровне напряжений грунт ведет себя как упругое тело.

2. При превышении уровнем напряжений предела упругости, грунт начинает работать в стадии пластических деформаций, а затем в стадии пластического течения (если уровень напряжений будет значительно повышаться). Эта стадия НДС представляется нам особенно важной, так как при активном нагружении пластические деформации являются определяющими и составляют до 95 % от всех деформаций [5].

3. При постоянном уровне напряжений (установившееся горное давление) начинают возникать деформации, связанные со временем (явление ползучести). При задержке деформаций выработки постановкой крепления на части сечения выработки происходит расслабление напряжений (явление релаксации), причем на остальном участке сечения (ниже горизонтальной оси) из-за установившегося уровня напряжений может развиваться и ползучесть.

4. Характер остаточных деформаций (неупругих) зависит от свойств породы и они могут происходить или в виде пластических деформаций и вязкопластического течения или в виде хрупкого разрушения [6].

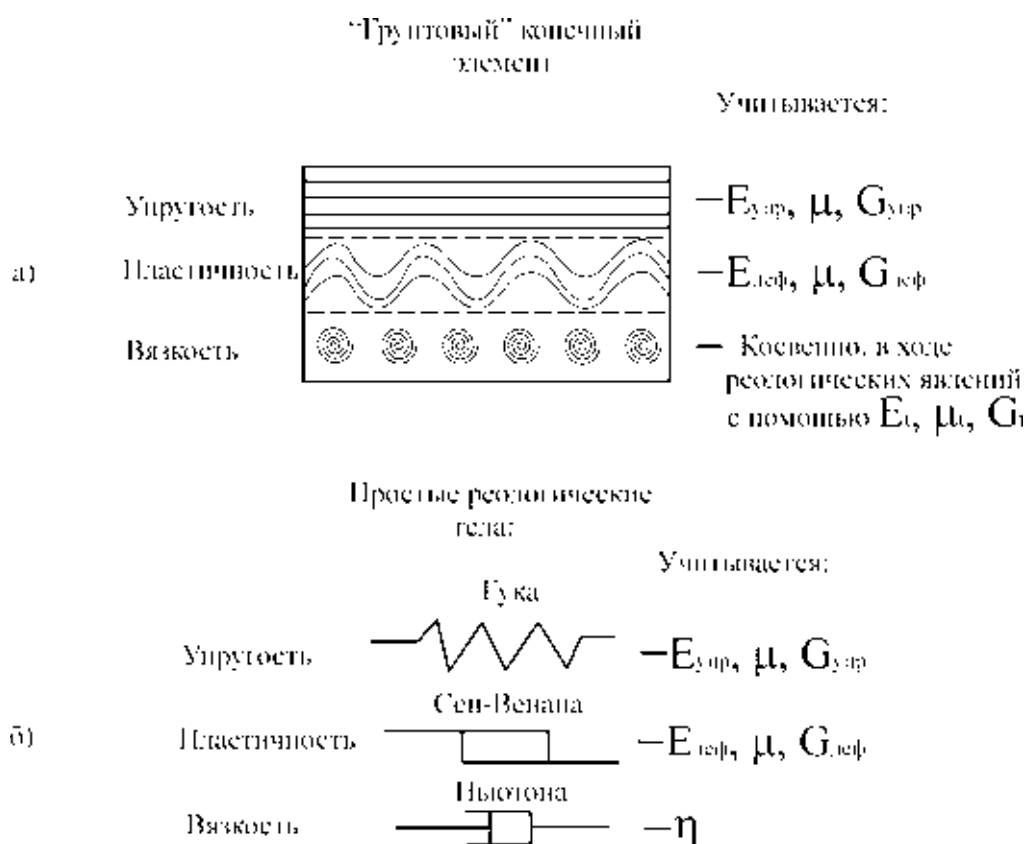
Рассматривая эти положения в ходе анализа НДС как процессы развития обратимых (связанных со свойством упругости), необратимых равновесных (связанных со свойством пластичности) и необратимых неравновесных (связанных со свойством вязкости) деформаций [7], можно сделать вывод, что «грунтовый» элемент должен имитировать эти свойства. Это является условием отображения действительных свойств исследуемого объекта в имитационной модели.

На рис. 1, а показан «грунтовый» элемент, который наделен кардинальными реологическими характеристиками: упругостью и пластичностью прямо, вязкостью – косвенно.

Такое определение свойств связано с тем, что теоретически можно наделить элемент любыми основными свойствами реального объекта, но практически сложность в таком наделении элемента вязкостью состоит в следующем. Исследование любых моделей, в том числе имитационных – это процесс, который связан с фактором времени непрямо. Точнее говоря, исследование модели МКЭ происходит как бы вне времени, так как этот фактор сложно отразить. Поэтому нами была предложена замена течения времени и его изменения набором дискретных состояний, то есть развитием, а ведь известно, что любое развитие – это изменение и в его формировании участвует время. Таким образом, время учитывается непрямо, что позволяет сделать вывод, что и вязкость можно учесть непрямо, в ходе развития реологических явлений, ею вызванных (различного рода упругие последствия, вязкопластическое течение и т.д.).

Следует отметить, что нами из рассуждений выведены такие свойства породы, как хрупкость и прочность. При этом, как и некоторыми другими авторами

[8] хрупкость рассматривается как нефизический термин и ее наличие в наборе кардинальных свойств породы излишне. Будем считать, что разрушение является хрупким, если для его зарождения, протекания и завершения достаточно энергии упругого деформирования [8]. Следовательно, хрупкость – явление, связанное с упругостью. Прочность также является кардинальным реологическим свойством (по Рейнеру [9]), но можно считать ее свойством, объемлющим остальные три, и являющейся как бы пределом существования склерономных (не зависящих от времени – упругость, пластичность) и реономных (зависящих от времени – вязкость) свойств. Прочность в имитации свойств породы посредством «грунтового» элемента также учитывается непрямо, но ее значением определяется возможность существования НДС или разрушение системы вследствие превышения напряжениями прочности системы.



а) в «грунтовом» КЭ; б) в простых реологических телах  
Рис. 1 – Кардинальные реологические характеристики.

Таким образом можно сделать вывод, что «грунтовой» элемент (рис. 1, а) уже нельзя назвать конечным элементом без свойств, так как он является также и графическим выражением реологических свойств породы, подобно простым реологическим телам (рис. 1, б). Известно [2-4, 9], что, зная законы простых реологических тел, можно определить и НДС системы. Таким образом, «грунтовой» элемент – имитация свойств части системы «крепь-массив», а именно массива.

Авторами приняты следующие «грунтовые» конечные элементы:

1. Стержень, наделенный упругостью, вязкостью, пластичностью, имеющий возможность разрушения подобно хрупкому или пластическому. Если убрать из этого элемента пластичность и вязкость, то получится, как частный случай, упругое основание Фусса-Винклера. При последовательном соединении упругости и пластичности, этот стержень станет похожим по свойствам на сложное реологическое тело Прандтля (упруго-пластическое тело); при последовательном соединении упругости и вязкости – тело Максвелла (упруго-вязкое тело) и т.д. В сущности можно представить стержень некоторыми видами сложных реологических тел, представленных комбинацией трех кардинальных реологических характеристик.

2. Прямоугольный или треугольный пластинчатый элемент. По сравнению со стержнем, сущность этого элемента не меняется – он остается наделенным комбинацией реологических характеристик, но такой элемент позволяет качественно, с помощью визуализатора расчетного комплекса по уровню изолиний  $\sigma_n$  и  $\tau_{cp}$ , различать зоны упругого и пластического деформирования, концентраторы напряжений и т.д. Кроме того, с применением пластинчатых элементов повышается точность соответствия модели действительному объекту (при условии проверки дискретизационного процесса на сходимость).

3. Объемные конечные элементы типа гексаэдра или тетраэдра. Их применение, в отличие от пластинчатых, которые являются наиболее оптимальным «грунтовым» конечным элементом, довольно затруднительно в силу большого объема времени, требуемого для произведения расчетов и трудности интерпретации полученных расчетных данных.

Имитация упруго-вязко-пластического массива на основе «грунтовых» элементов непосредственно связана с контролем НДС в ходе инкрементальных нагружений (нагружений ступенями). Исследователь является тем звеном, которое анализирует НДС и корректирует его в соответствии с данными натурных или экспериментальных исследований. Таким образом, имитационная модель отражает процесс НДС в соответствии с реальными реологическими характеристиками. Практически это выражается в следующих действиях.

1. После ступени нагружения производится расчет напряжений и деформаций в модели.

2. По формулам (2) и (3), проверяется состояние «грунтовых» элементов: работа их в упругой стадии, переход в пластическую или образование зон ползучести (релаксации).

$$\tau_{cp} = \begin{cases} < \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \text{ деформация упругая} \\ = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \text{ граница текучести} \\ > \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \text{ деформация пластическая} \end{cases} \quad (2)$$

и для реологических явлений (по Маслову) [10]:

$$\tau_{cp} = \begin{cases} < \tau_{lim}, \text{ ползучести нет} \\ = \tau_{lim}, \text{ порог ползучести} \\ > \tau_{lim}, \text{ развитие ползучести} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tau_{cp}$  – среднее касательное напряжение на площадке;

$$\tau_{lim} = \sigma_n \cdot tg\varphi_W + C_c,$$

где  $\tau_{lim}$  – порог ползучести (касательное напряжение, вызывающее ползучесть);  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на данной площадке;  $\varphi$ ,  $\varphi_W$  – соответственно угол внутреннего трения и угол внутреннего трения при влажности  $W$ ;  $C$ ,  $C_c$  – соответственно сцепление и жесткое сцепление с характером необратимых связей.

3. Корректировка деформативных характеристик системы в соответствии с графиками, полученными из экспериментальных исследований.

На рис. 2. показан алгоритм поиска конечных элементов, которые подверглись пластическому деформированию.

Стоит выделить авторскую методику учета реологических явлений типа ползучести и релаксации. Нами принято условие: в процессе развития НДС в системе «крепь-массив» проявляют себя склерономные реологические характеристики (упругость и пластичность); при прекращении активного изменения напряжений и деформаций важнейшую роль начинает играть реономная реологическая характеристика – вязкость. Это условие не противоречит условиям возникновения реологических явлений – ползучести, развивающейся при постоянных напряжениях, и релаксации, развивающейся при постоянных деформациях. Поэтому авторами предлагается имитация явлений, связанных с проявлением вязкости, с помощью характеристики, названной «временной» модуль деформации  $E_t$  и «временной» коэффициент Пуассона  $\mu_t$ , которые взяты из натуральных испытаний на ползучесть или релаксацию [11]. На рис. 3 показан ряд постоянных во времени напряжений и семейство кривых ползучести, которые им соответствуют.

Найдя зоны ползучести с помощью МКЭ на основе выражения (3) и определив напряжение, которое установилось, можно поставить ему в соответствие кривую ползучести. Применяя принцип дискретных состояний, найдем  $E_t$  в определенный промежуток времени  $\Delta t$  исходя из графиков, представленных на рис. 3, как:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\Delta\varepsilon$  – некоторое приращение деформаций;  $\sigma = \text{const}$  – установившееся напряжение. Так как из условия ползучести  $\sigma = \text{const}$ , то в промежуток времени

$$\Delta t, E_t \text{ равняется } E_t = \frac{\Delta \sigma}{\varepsilon}.$$

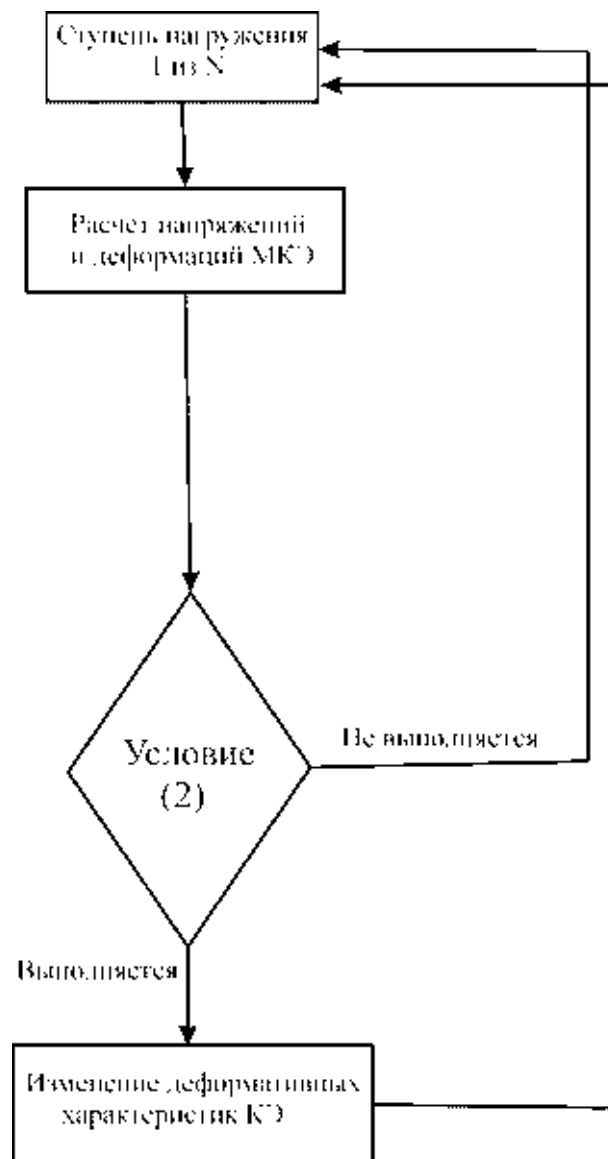


Рис. 2 – Алгоритм поиска КЭ, в которых произошло пластическое деформирование

Коэффициент Пуассона также изменяется во времени [12], но его изменение сложнее учесть из-за ограниченности практических исследований в этой области, хотя алгоритм учета изменения  $\mu_t$  подобен учету изменения модуля деформации  $E_t$ .

Предложенная авторами реализация упруго-вязко-пластических свойств массива не претендует на знание конечной истины, требует корректировок и дополнений, но, основываясь на фундаментальных положениях механики сплошной среды, механики подземных сооружений и строительной механики, является попыткой максимального учета реальных свойств объекта в одной модели. Решение проблемы реализации упруго-вязко-пластического массива на

основе численного анализа МКЭ с помощью «грунтовых» элементов дает возможность корректировки размеров крепи подземных сооружений за счет более точного понимания взаимодействий в системе «крепь-массив» и, соответственно, ведет к экономии капиталовложений, к новым разработкам в сфере механики подземных сооружений, к внедрению новых научно обоснованных ресурсосберегающих технологий.

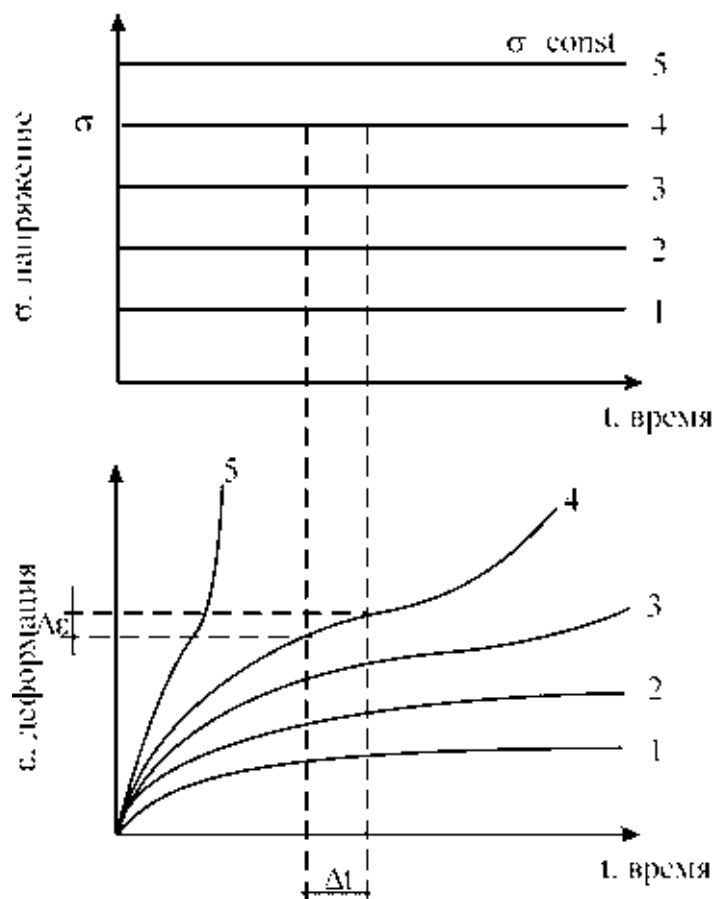


Рис. 3 – Графики постоянных во времени напряжений  $\sigma - t$  и соответствующее им семейство кривых ползучести  $\varepsilon - t$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Прочность пространственных элементов конструкций. Ч.1. Основы механики сплошной среды: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1979. – 384 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 382 с.
4. Будин А.Я. Длительная прочность сооружений на деформирующихся во времени основаниях и реологические свойства грунтов / Тр. Третьего Всесоюз. симп. по реологии грунтов, Ленинград, 3-8 сентября 1979. – Ереван: Изд-во Ереванского университета, 1980. – С. 10-31.
5. Зарецкий Ю.К. Новая концепция вязко-пластического течения грунтов / Тр. Третьего Всесоюз. симп. по реологии грунтов, Ленинград, 3-8 сентября 1979. – Ереван: Изд-во Ереванского университета, 1980. – С. 58-73.
6. Biarez I., Bellier I. Fragilité d'une argile étudiée à l'appareil triaxial. C.r. Acad. Sci., Paris, 1969. – № 10. – pp. 269-271.
7. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
8. Финкель В.М. Физика разрушения. – М.: Metallургия, 1970. – 376 с.
9. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
10. Маслов Н.Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. –

М.: Стройиздат, 1984. – 176 с.

11. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

12. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 384 с.

**УДК 622.831.322:622.831.325**

Д-р техн. наук, проф. К.К. Софийский,  
канд. техн. наук Д.П. Силин,  
канд. техн. наук Э.И. Мучник,  
инж. В.Г. Золотин (ИГТМ НАН Украины)

## **ОБРАЗОВАНИЕ ЗОНЫ ДИСПЕРГИРОВАННОГО УГЛЯ В ПРОЦЕССЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Викладено основні взаємозв'язки об'єму зони диспергованого вугілля з властивостями пласта та параметрами гідродинамічної дії.

## **FORMATION OF A ZONE DESTROYED COAL DURING HYDRODYNAMICAL INFLUENCE**

The basic dependences of volume of a zone destroyed coal from properties of a coal layer and parameters of hydrodynamic influence are stated.

Развитие добычи угля в настоящее время характеризуется все более возрастающей интенсификацией горных работ, происходящей на фоне неуклонного ухудшения горно-геологических условий их ведения.

Углубление угледобычи сопровождается повышением опасности внезапных выбросов, выдавливания и обрушения угля и породы. Традиционные способы добычи угля и существующие методы предотвращения внезапных выбросов угля и газа при проведении горных работ не способны обеспечить высокую степень безопасности в совокупности с высокой производительностью труда. В связи с этим в настоящее время возникли нетрадиционные способы предотвращения внезапных выбросов угля и газа и добычи угля.

Одним из таких способов, эффективно влияющих на структуру газонасыщенных и выбросоопасных угольных пластов, способствующих его разгрузке и разупрочнению, а также интенсификации процессов дегазации метана и позволяющих решить задачу безопасного ведения горных работ при условии повышения нагрузки на забой является гидродинамическое воздействие на массив.

Изучение процессов дезинтеграции угольных пластов при гидродинамическом воздействии чрезвычайно важно, так как разупрочнение и разрушение является основополагающим фактором, определяющим обеспечение безопасности и эффективности горных работ.

При гидродинамическом воздействии на пласт наблюдаются процессы изменения структуры и газоотдачи угольного пласта, взаимосвязанные друг с другом, а именно – интенсификация дегазации, вследствие которой резко снижается возможность возникновения внезапного выброса угля и газа, и одновре-